

На правах рукописи



Дунаев Андрей Михайлович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Бахвалов Сергей Владимирович,**
кандидат технических наук, доцент института
информационных технологий и анализа данных
ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Официальные оппоненты: **Жиравок Алексей Нилович,**
доктор технических наук, профессор
департамента автоматизации и робототехники
школы Мирового океана ФГАОУ ВО
«Дальневосточный федеральный университет»

Еделев Алексей Владимирович,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник отдела № 30 ФГБУН «Институт
систем энергетики им. Л.А. Мелентьева»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный
технический университет», г. Ангарск

Защита состоится 12 мая 2022 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ИрГУПС») по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-801, тел. 8(3952) 638-311, e-mail: diss_sovet@irgups.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИрГУПС» и на сайте <http://www.irgups.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Ю.М. Краковский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Важной задачей в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами является обеспечение надёжности функционирования сложного электрооборудования (ЭО), к которому принадлежат силовые полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ), входящие в состав частотно-регулируемых электроприводов общепромышленного электрооборудования. К означенной технике, в частности, относятся асинхронные электроприводы подъёмных кранов, конвейеров, насосов, вентиляторов, металлорежущих станков и промышленных роботов. Кроме того, значительное количество технологического оборудования для производства и ремонта имеет в своём составе современные частотно-регулируемые электроприводы.

Преобразователи частоты являются самым сложным электрооборудованием современного частотно-регулируемого электропривода, поскольку имеют в своём составе силовые полупроводниковые диоды и транзисторы, а также микропроцессорную систему управления ПЧ, включая систему управления всего электропривода.

Решению проблемы сокращения сроков и повышения качества диагностирования означенного сложного оборудования может послужить использование методов технической диагностики. Логические алгоритмы методов данного класса представляют собой алгоритмы, использующие аппарат математической логики. Математическая модель объекта диагностирования (ОД) рассматривает ОД как систему связанных между собой функциональных элементов, которые могут находиться в одном из двух состояний: 0 – не в норме, 1 – в норме [Техническая диагностика: сборник трудов I всесоюзного совещания по технической диагностике / Под ред. П.П. Пархоменко. – М. : НАУКА, 1972].

Методические основы исследований в области диагностики заложены в работах Е. Лавлера, Д. Вуда, А.В. Мозгалева, О.И. Осипова, Ю.С. Усынина, П.П. Пархоменко и других учёных.

В настоящее время наиболее трудоёмкими составляющими процесса диагностирования являются оценка ситуации и принятие решения, что объясняется постоянно возрастающими объёмами информации, которую необходимо учитывать для повышения объективности оценки ситуации, а также эвристическим характером знаний, позволяющих эксперту получать качественные и эффективные решения поставленных задач. В связи с данными обстоятельствами, возникает необходимость комплексной автоматизации процесса сбора информации и принятия решения, для осуществления которой представляется перспективным использовать интеллектуальные системы, разработанные на основе применения логических методов технической диагностики и методологии экспертных систем (ЭС).

Значительный вклад в развитие теории экспертных систем внесли научные труды Т.А. Гавриловой, Д. Уотермена, П. Джексона, Э.В. Попова, С.Н. Васильева, Л.В. Массель, Л.В. Аршинского и иных исследователей.

Таким образом, разработка и исследование автоматизированной подсистемы диагностирования (АПД) электрооборудования преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, на основе применения логических алгоритмов методов технической диагностики и технологии экспертных систем, является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является создание автоматизированной подсистемы диагностирования электрооборудования преобразователей частоты, повышающей эффективность процесса поиска неисправностей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

- 1) проанализировать современное состояние методов и систем диагностирования электрооборудования;
- 2) на основании выполненного анализа предложить структуру и алгоритмы функционирования автоматизированной подсистемы диагностирования электрооборудования преобразователей частоты;
- 3) в соответствии с предложенными структурой и алгоритмами реализовать автоматизированную подсистему диагностирования электрооборудования преобразователей частоты;
- 4) провести апробацию реализованной автоматизированной подсистемы диагностирования электрооборудования преобразователей частоты.

Объектом исследования является сложное электрооборудование преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами.

Предметом исследования являются методы разработки интеллектуальных диагностических систем для поиска и устранения неисправностей электрооборудования преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- 1) предложены логические алгоритмы диагностирования электрооборудования с учётом его технических состояний, отличающиеся от известных алгоритмов половинного деления правилами выбора первой проверки в объекте диагностирования;
- 2) разработана процедура построения дерева оптимального логического алгоритма диагностирования электрооборудования;
- 3) построено дерево оптимального логического алгоритма диагностирования преобразователей частоты, отличающегося от известных алгоритмов диагностирования минимальным показателем средних затрат диагностирования;
- 4) разработана структура базы знаний экспертного комплекса для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты, опирающаяся на предложенный оптимальный логический алгоритм диагностирования.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- 1) построена база знаний экспертного комплекса для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты;
- 2) разработана автоматизированная подсистема диагностирования электрооборудования преобразователей частоты;
- 3) разработанная автоматизированная подсистема диагностирования позволяет существенно сократить время поиска неисправностей электрооборудования преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, по сравнению с традиционными методами поиска и устранения неисправностей, что подтверждено Актом об использовании результатов научной работы в ООО «Транс-Атом» (специализирующемся на производстве технологического оборудования).

Тематика работы соответствует пунктам паспорта специальности **2.3.3 (05.13.06)**: п. 10 «Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов

прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; п. 14 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)»; п. 16 «Теоретические основы, методы и алгоритмы построения экспертных и диалоговых подсистем, включенных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Методы исследований. Выводы и результаты работы получены с использованием математического аппарата булевой алгебры, методов оптимизации, технологии программирования на языках высокого уровня, технологии разработки экспертных систем.

Степень достоверности результатов работы подтверждается результатами апробации при диагностировании электрооборудования преобразователей частоты.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- 1) логические алгоритмы диагностирования электрооборудования, обладающие большей эффективностью в применении к преобразователям частоты;
- 2) оптимальный логический алгоритм диагностирования преобразователей частоты, характеризуемый минимальными затратами времени;
- 3) структура базы знаний экспертного комплекса для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты, обеспечивающая их наиболее эффективное диагностирование за счёт опоры на оптимальный логический алгоритм;
- 4) приложение для автоматизированного построения дерева оптимального логического алгоритма диагностирования преобразователей частоты.

Реализация результатов работы подтверждена Актом об использовании результатов научной работы в ООО «Транс-Атом» и Актом об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе ФГБОУ ВО ИРНИТУ.

Апробация работы. Диссертационные исследования и выводы обсуждались: на Международном семинаре «Критические инфраструктуры в цифровом мире» в Институте систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), г. Иркутск, 2020 г.; на XI Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, 2020 г.; на Международной научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс» в Ангарском государственном техническом университете (АнГТУ), г. Ангарск, 2019 г.; на Международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития» в ИрГУПС, г. Иркутск, 2015 г.; на Байкальских Всероссийских конференциях с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» в ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск, 2013-2020 гг.; на Всероссийских научно-практических конференциях «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» в ИРНИТУ, г. Иркутск, 2013-2021 гг.; на Всероссийских молодёжных научно-практических конференциях «Винеровские чтения» в ИРНИТУ, г. Иркутск, 2015-2018 гг.; на семинарах кафедры «Электропривод и электрический транспорт» ИРНИТУ, г. Иркутск, 2015-2021 гг.

Личный вклад. Результаты исследований, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. В совместных публикациях

результатов исследований автору принадлежат: логические алгоритмы диагностирования электрооборудования; разработка базы знаний экспертного комплекса для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты; разработка приложения для автоматизированного построения дерева оптимального логического алгоритма диагностирования преобразователей частоты. Также лично автором проведена апробация автоматизированной подсистемы диагностирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 работы, из них 7 статей – в изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Российской Федерации (ВАК РФ) для опубликования научных результатов диссертаций; 1 статья – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по смежным специальностям; 1 статья, индексируемая в базе Scopus; 2 свидетельства о государственной регистрации (база данных и программа для ЭВМ). В работах с соавторами соискателю в среднем принадлежит 50 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, имеющего 109 наименований, и пяти приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 161 страницу, включая 44 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, отражены новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведён анализ существующих методов и систем диагностирования электрооборудования. Рассмотрена классификация методов построения программ проверок, предложенная П.П. Пархоменко, включающая точные методы, в числе которых особенно выделены оптимальные методы, и приближённые методы, в числе которых особенно выделены методы построения программ, использующие функции предпочтения. Предложена новая классификация приближённых методов построения программ проверок, дополняющая классификацию П.П. Пархоменко. В рамках новой классификации выполнен анализ энтропийных, многошаговых и комбинированных методов. Описаны экспертные системы диагностирования электрооборудования. Детальным образом проанализированы экспертные системы для диагностирования электрооборудования, используемого в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами. Выполнен сравнительный анализ инструментальных средств построения диагностических экспертных систем.

Эффективное диагностирование ЭО может быть обеспечено за счёт применения специальных методов, выбор которых обусловлен структурой объекта диагностирования и требуемой глубиной поиска. Логические алгоритмы данных методов находят практическое применение в системах диагностирования электрооборудования.

Перспективным направлением в разработке систем диагностирования ЭО является применение новой методологии, соединяющей эффективные логические алгоритмы методов диагностирования и методологию экспертных систем, которые способны сочетать в себе знания многих экспертов в области поиска неисправностей и ремонта электрооборудования.

Анализ существующих методов и систем диагностирования ЭО выявил множество эффективных алгоритмов и систем, в том числе, ориентированных на ЭО, используемое в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, при отсутствии методов и систем, предназначенных для ЭО ПЧ.

Перспективная комбинированная методология разработки систем для диагностирования электрооборудования требует усовершенствования в аспекте разработки новых логических алгоритмов диагностирования ЭО, обладающих большей эффективностью в применении к ПЧ, а также в аспекте разработки новых систем, способных обеспечить диагностирование данного ЭО в режиме реального времени.

Во второй главе представлены результаты разработки структуры и алгоритмов функционирования новой автоматизированной подсистемы для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, в режиме реального времени. Разработана структура подсистемы. Разработаны алгоритмы функционирования подсистемы в режиме реального времени. Предложены новые алгоритмы диагностирования электрооборудования. Проведён анализ эффективности новых и известных алгоритмов диагностирования ЭО в применении к ПЧ, показавший, что алгоритмы, разработанные автором, более эффективны для ПЧ, чем существующие. Предложена процедура разработки оптимального логического алгоритма диагностирования ПЧ. Разработан оптимальный алгоритм диагностирования ПЧ.

АПД интегрируется в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП), структура которой приведена на рисунке 1, содержащем следующие условные обозначения: стрелки – интерфейсы и протоколы передачи данных; АРМ – автоматизированное рабочее место. Данная типовая структура АСУ ТП включает три уровня.

Нижний уровень (полевой) составляют исполнительные устройства и датчики, непосредственно участвующие в технологическом процессе. Для организации связи полевой шины (*Fieldbus*) с датчиками и исполнительными устройствами используются интерфейсы (в частности, *AS*).

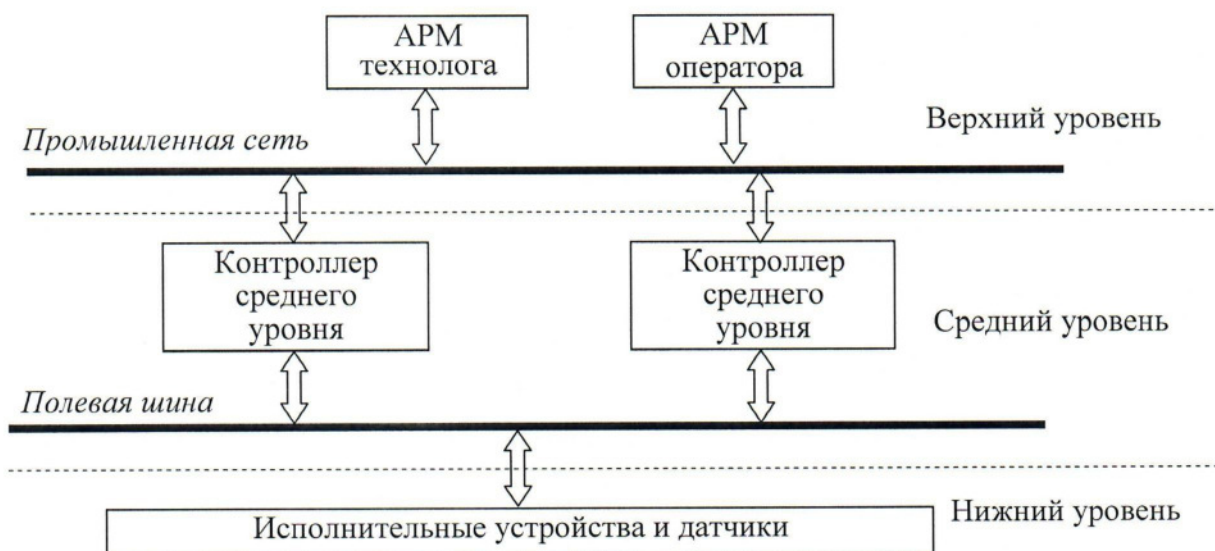


Рисунок 1 – Типовая структура АСУ ТП

Средний уровень (контроллерный) включает контроллеры, связанные по полевой шине с исполнительными устройствами и датчиками. Для передачи данных на указанном уровне могут применяться различные интерфейсы и протоколы (*Profibus, Modbus, CAN, LON*).

Верхний уровень (информационно-вычислительный) содержит АРМ технолога и АРМ оператора, которые через промышленную сеть (*Industrial Ethernet*) поддерживают связь с контроллерами среднего уровня. Верхний уровень служит для визуализации и диспетчеризации технологического процесса.

АПД использует ресурсы АРМ оператора (в АСУ ТП усечённого строения – контроллера среднего уровня). Структура АПД показана на рисунке 2.

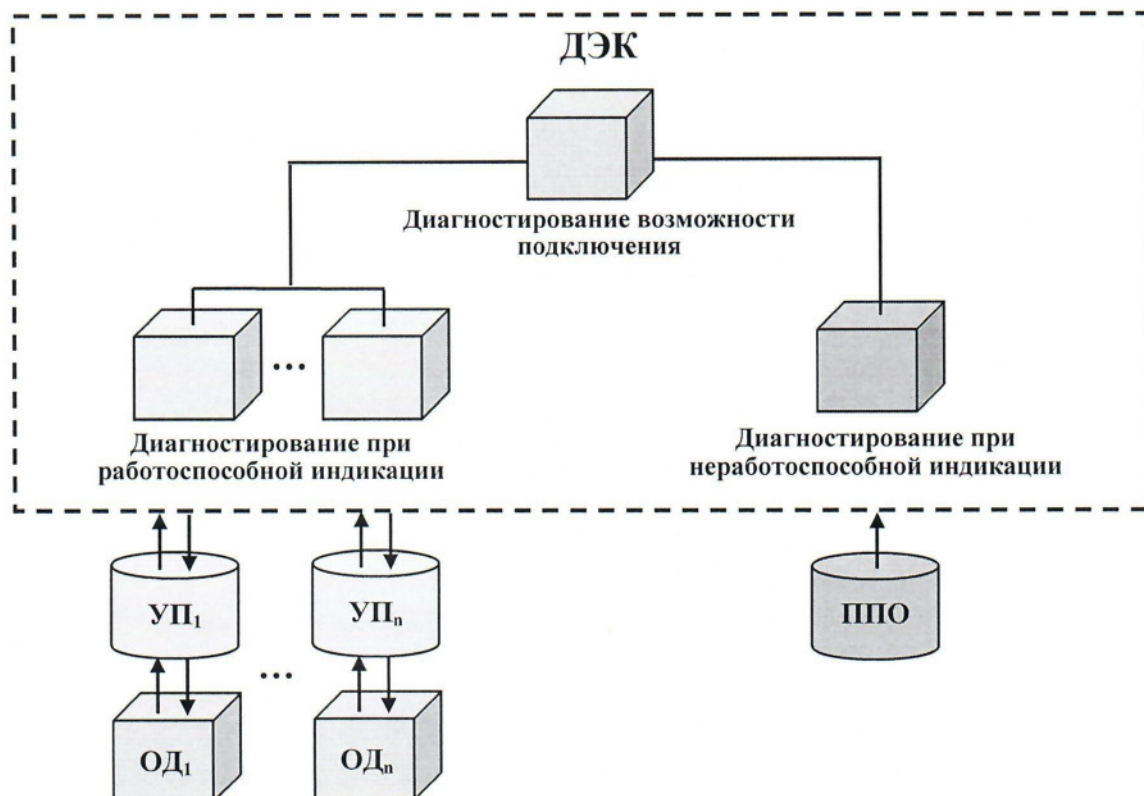


Рисунок 2 – Общая структура АПД ЭО ПЧ

На рисунке 2 имеют место следующие условные обозначения: ДЭК – диагностический экспертный комплекс, составляющий основу АПД; $УП_1 \dots УП_n$ – управляющие программы; $ОД_1 \dots ОД_n$ – объекты диагностирования; ППО – приложение для построения дерева оптимального алгоритма диагностирования.

Структура базы знаний (БЗ) ДЭК представлена на рисунке 3.

Алгоритм комплекса управляющих программ (УП), необходимых для диагностирования ПЧ в режиме реального времени, проиллюстрирован рисунком 4. На рисунке 4 имеют место следующие условные обозначения: «У1» – заданное время задержки истекло.

Логические алгоритмы диагностирования ЭО, занимающие особую позицию среди алгоритмов функционирования АПД, опираются на функциональную схему (ФС) ЭО и описывают порядок элементарных диагностических проверок её блоков. ФС подключения низковольтного промышленного ПЧ представлена на рисунке 5.

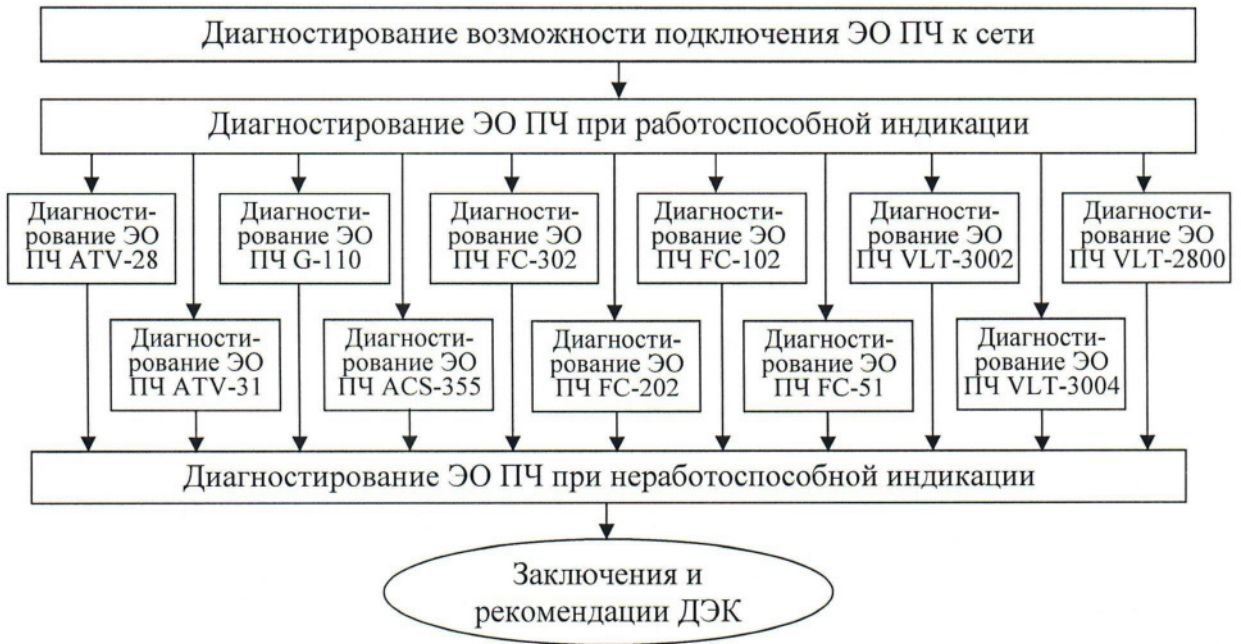


Рисунок 3 – Структура базы знаний ДЭК

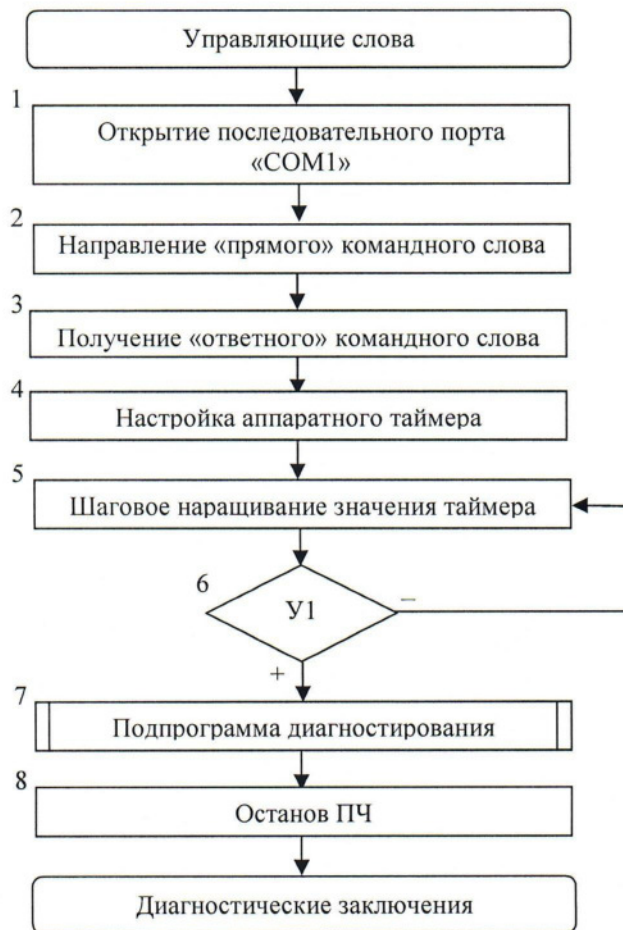


Рисунок 4 – Алгоритм комплекса управляющих программ

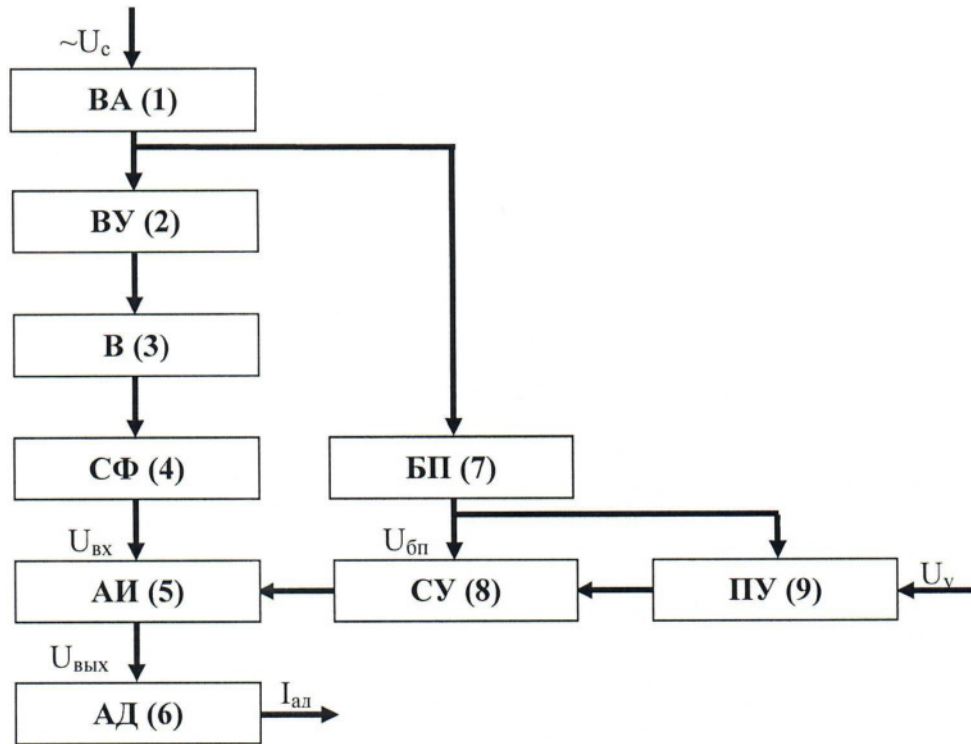


Рисунок 5 – Функциональная схема подключения ПЧ

На рисунке 5 имеют место следующие условные обозначения: ВА – вводной автоматический выключатель; ВУ – входное устройство (фильтр или трансформатор); В – выпрямитель (неуправляемый или управляемый); СФ – сглаживающий фильтр; АИ – автономный инвертор; АД – асинхронный двигатель; БП – блок питания системы управления; СУ – система управления; ПУ – панель управления; $\sim U_c$ – напряжение питающей сети переменного тока; $U_{вх}$ – входное напряжение силовой схемы преобразователя; $U_{вых}$ – выходное напряжение преобразователя; $I_{ад}$ – ток асинхронного двигателя; $U_{бп}$ – выходное напряжение блока питания; U_y – сигнал задания частоты.

Характеристики технических состояний (ХТС) преобразователя частоты – вес технического состояния $p(e_i)$ и время проверки $t(e_i)$ – определённые как экспертные оценки и нормированные по выражениям (1) и (2), указаны в таблице 1.

$$0 < p(e_i) < 1, \quad 0 < t(e_i) < 1, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N p(e_i) = 1, \quad \sum_{i=1}^N t(e_i) = 1, \quad (2)$$

где N – число технических состояний ОД.

Таблица 1 – Характеристики технических состояний ПЧ

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p(e_i)$	0,01	0,04	0,05	0,02	0,4	0,1	0,14	0,2	0,04
$t(e_i)$	0,05	0,05	0,1	0,02	0,07	0,06	0,05	0,5	0,1

Мерой эффективности логического алгоритма диагностирования, позволяющей оценить качество алгоритма в целом, являются средние затраты на определение одного технического состояния объекта диагностирования (ОД), обозначенные как C (Z_0, E_T) и вычисляемые по формуле:

$$C(Z_0, E_T) = \sum_{i=1}^N [p(e_i) \sum_{k \in L_i} t(e_k)], \quad (3)$$

где Z_0 – первая проверка алгоритма диагностирования; E_T – множество всех технических состояний ОД; $p(e_i)$ – вес технического состояния; $t(e_i)$ – время проверки; e_i – техническое состояние ОД ($e_i \in E_T$, $i=1, 2, \dots, N$; N – число технических состояний ОД); L_i – последовательность проверок от проверки Z_0 до проверки i -того блока Z_i ;

$\sum_{k \in L_i} t(e_k)$ – сумма времён проверок последовательности L_i .

Граф нового **MPT-алгоритма** метода поиска по критерию минимума времени первой проверки и с учётом отношений характеристик технических состояний проиллюстрирован рисунком 6. Его первая проверка Z_0 должна обладать наименьшим значением времени проверки $t(e_i)$, а при равенстве значений $t(e_i)$ – контролировать блок, расположенный ближе к центральной части ФС. Указанные правила выбора первой проверки составляют научную новизну данного алгоритма и иных алгоритмов, разработанных автором. Критерий близости к центральной части функциональной схемы, бывший основным в классическом методе половинного деления, в новых методах является вспомогательным. Последующие проверки выбираются по мере уменьшения соотношения $p(e_i)/t(e_i)$.

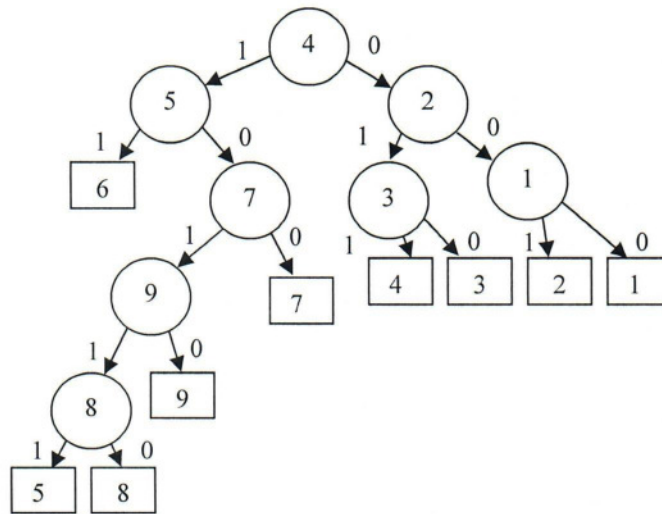


Рисунок 6 – Граф MPT-алгоритма

На рисунке 6 имеют место следующие условные обозначения: круги – элементарные проверки Z_i ($i=1, 2, \dots, N$); стрелки – результаты элементарных проверок блоков (1 – исправен, 0 – неисправен); прямоугольники – итоги диагностирования (номера неисправных блоков).

В зависимости от исходов промежуточных проверок, алгоритм диагностирования может содержать от 2 до 5 шагов. Его средние затраты по формуле (3), составляют:

$$C(Z_0, E_T) = p(e_4)t(e_4) + p(e_2)[t(e_4)+t(e_2)] + p(e_3)[t(e_4)+t(e_2)+t(e_3)] + p(e_1)[t(e_4)+t(e_2)+t(e_1)] + p(e_5)[t(e_4)+t(e_5)] + p(e_7)[t(e_4)+t(e_5)+t(e_7)] + p(e_9)[t(e_4)+t(e_5)+t(e_7)+t(e_9)] + p(e_8)[t(e_4)+t(e_5)+t(e_7)+t(e_9)+t(e_8)] = 0,2261.$$

Аналогичным образом выполнен анализ эффективности ещё 2 новых и 9 известных алгоритмов диагностирования в применении к ПЧ. Результаты данного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Эффективность алгоритмов диагностирования в применении к ПЧ

Название алгоритма	Средние затраты $C(Z_0, E_T)$	Место алгоритма
МРТ-алгоритм	0,2261	1
МР-алгоритм	0,2281	2
РТТ-алгоритм	0,2285	3
PTS-алгоритм	0,229	4
РТ-алгоритм	0,254	5
РТР-алгоритм	0,2879	6
РТV-алгоритм	0,3387	7
ПИ-алгоритм	0,4415	8
MN-алгоритм	0,4595	9
MV-алгоритм	0,462	10
P-алгоритм	0,5141	11
T-алгоритм	0,5598	12

Таким образом, два из трёх новых алгоритмов (МР- и МРТ-) более эффективны при диагностировании неисправностей промышленных ПЧ, чем весомая часть известных логических алгоритмов. Однако, все проанализированные алгоритмы являются квази-оптимальными для ПЧ. Отсюда следует целесообразность разработки оптимального алгоритма диагностирования преобразователей частоты.

Объектом оптимизации в означенной задаче является логический алгоритм диагностирования преобразователя частоты как программа проверок блоков функциональной схемы его подключения. Критерий оптимальности логического алгоритма диагностирования есть минимальность его средних затрат, определяемых по формуле (3). Целевая функция оптимизации, являющаяся универсальной и применяемая при неравных весах технических состояний (согласно П.П. Пархоменко), имеет следующий вид:

$$C(Z_0, E_T) \rightarrow \min \quad (4)$$

В качестве метода оптимизации выбран алгоритмический регулярный метод прямого перебора (по П.П. Пархоменко), т.к. он даёт гарантию рассмотрения всех возможных вариантов программ проверок. Для решения поставленной задачи выбранным методом предложена процедура, общая блок-схема которой проиллюстрирована рисунком 7. В рамках диссертации автором произведена детализированная алгоритмизация каждого из этапов процедуры.

Результатом анализа функциональной схемы становятся логические множества целесообразности выполнения проверок (МВП) блоков после получения выходных сигналов других блоков (анализ выполняется для исправных и неисправных сигналов). На основании данных МВП и итерационно выбираемого блока первой проверки (БПП) производится составление множеств блоков ветвей (МБВ) логического алгоритма. Затем для каждой ветви составляется множество программ проверок (МПП). Детализированная алгоритмизация указанного этапа представлена на рисунке 8.

На рисунке 8 имеют место следующие условные обозначения: «У2» – исчерпаны блоки-претенденты младшего уровня и при этом из блоков-претендентов оставшихся уровней невозможно составить программу, равномогущую МБВ без элемента МБВ[J].

Из составленного МПП выбирается множество программ с минимальными затратами. Производится построение всех возможных вариантов дерева, синтезируемых из действующего БПП и программ проверок ветвей (а также определение затрат).

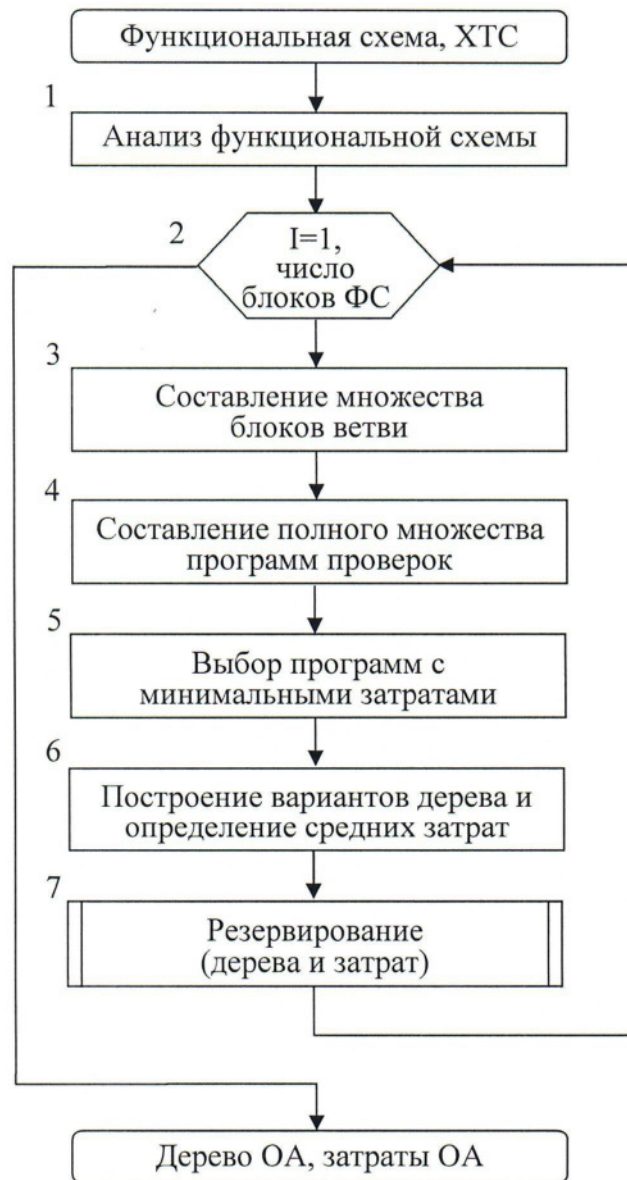


Рисунок 7 – Процедура разработки оптимального алгоритма

В заключение каждой I -той итерации процедуры (начатой выбором I -того блока ФС в качестве БПП) осуществляется резервирование вариантов алгоритмического дерева и определённых затрат. Алгоритмы диагностирования (один или несколько), которые соответствуют деревьям и затратам, остающимся в резерве по завершении последней итерации процедуры, являются оптимальными.

Предложенная процедура реализована для ПЧ в рамках следующей главы диссертационной работы.

В третьей главе приведены результаты реализации автоматизированной подсистемы диагностирования электрооборудования преобразователей частоты «FCDS». Реализовано построение дерева оптимального алгоритма диагностирования ПЧ. Реализовано диагностирование ЭО ПЧ в режиме консультационной помощи и в режиме реального времени.

Построение дерева оптимального алгоритма диагностирования ПЧ выполнено с помощью приложения «FC_OPTIM». Объём его листинга составляет 919 строк программного кода.

Один из двух полученных в итоге вариантов алгоритмического дерева соответствует графу МРТ-алгоритма. Таким образом, решение задачи оптимизации показало, что новый МРТ-алгоритм, ранее предложенный автором в качестве квази-оптимального, на самом деле является оптимальным для ПЧ.

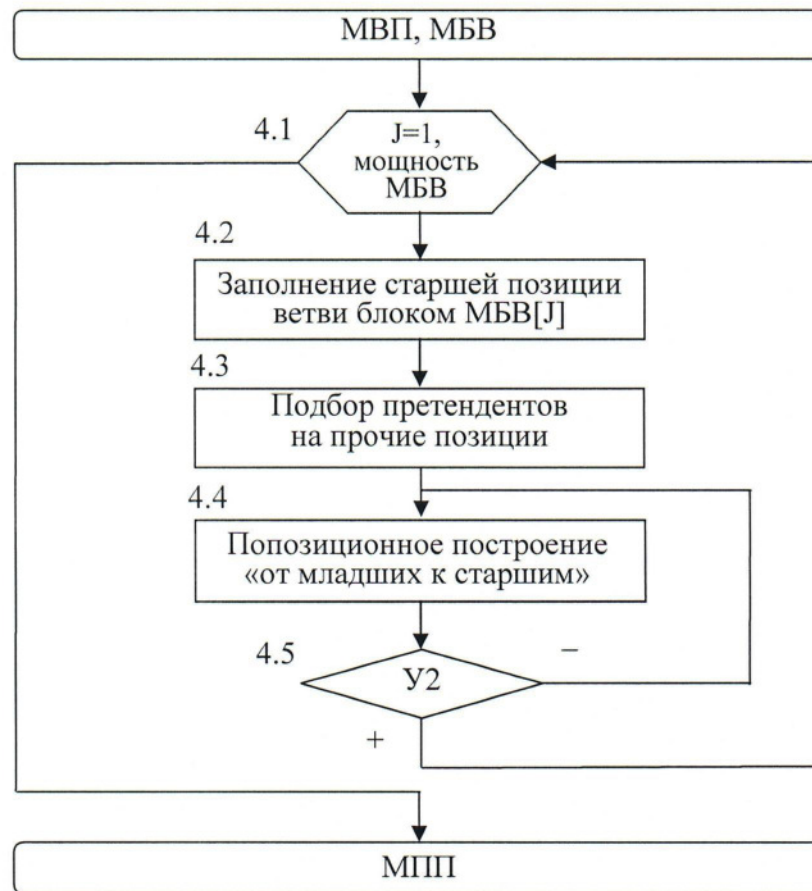


Рисунок 8 – Разработка оптимального алгоритма. Составление программ проверок

Диагностирование ЭО ПЧ в режиме консультационной помощи выполнено посредством экспертного комплекса «FC3», реализованного с помощью системы «Гераклит», разработанной в ИрГУПС Л.В. Аршинским. Детализированная структура его БЗ объемом 305 правил и 533 факта опирается на оптимальный МРТ-алгоритм.

Диагностирование ЭО ПЧ в режиме реального времени выполнено с помощью комплекса управляющих программ «FC_RTM». Объем его листинга составляет 157 строк программного кода.

На рисунке 9 показаны примеры функционирования реализованной АПД «FCDS» (слева направо: построение дерева оптимального алгоритма, форма диалога, протоколы диагностирования в режимах консультационной помощи и реального времени).

В четвертой главе описана апробация реализованной подсистемы. Проведён сравнительный анализ диагностирования и наладки ПЧ традиционными методами (работой только специалиста-наладчика) и новыми методами (с помощью автоматизированной подсистемы).

На первом этапе апробации посредством АПД «FCDS», с использованием примеров диагностирования ЭО современных ПЧ выполнено их собственное диагностирование по первичным признакам неисправностей. На втором этапе подведены итоги для выявления достоинств и недостатков предлагаемого способа

диагностирования. Корректность апробации обеспечена тем, что её участники работали независимо друг от друга. Её результаты представлены в таблице 3, содержащей следующие условные обозначения: ТМН – диагностирование традиционными методами; АПД – диагностирование с применением АПД «FCDS»; ЭП – электропривод.

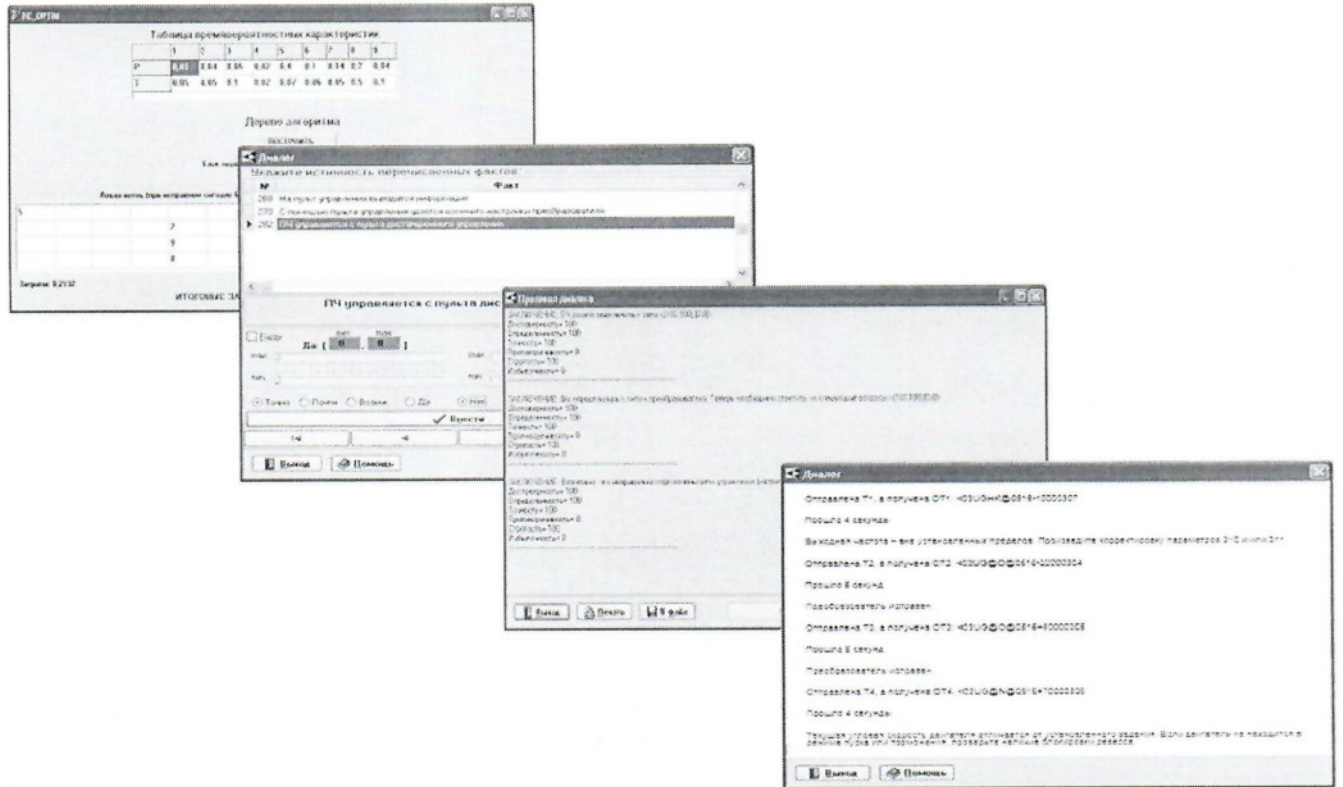


Рисунок 9 – Примеры функционирования АПД «FCDS»

Таблица 3 – Результаты апробации АПД «FCDS»

N п/п	Наименование объекта	Неисправность	Время диагностиро- вания, час		Общее время, час	
			ТМН	АПД	ТМН	АПД
1	Электропривод с ПЧ DANFOSS VLT-3002	Нет сигнала дистанционного управления	3	0,5	3,25	0,75
2	Электропривод с ПЧ DANFOSS VLT-3004	Нет вращения двигателя	23	0,5	24	1,5
3	ЭП с ПЧ Siemens SINAMICS G110	Не регулируется скорость двигателя	4	0,25	4,25	0,5
4	Электропривод с ПЧ Danfoss FC-302	Нет вращения двигателя	5	0,25	5,5	0,75
5	Электропривод с ПЧ Danfoss FC-51	Не фиксируется команда ПУСК дистанционного управления	3,5	0,25	3,75	0,5
6	Электропривод с ПЧ Danfoss FC-202	Скорость двигателя неконтролируемо увеличивается	6	0,25	6,5	0,75
7	Электропривод с ПЧ DANFOSS VLT2800	Нет сигнала обратной связи по скорости	5	0,25	5,5	0,75
8	Электропривод с ПЧ Danfoss FC-102	Нет вращения двигателя	13	0,25	34	21,25

9	Электропривод с ПЧ Schneider ATV28	Обрыв фазы двигателя	3,5	0,25	4,5	1,25
10	Электропривод с ПЧ Schneider ATV31	Обрыв фазы питания	1	0,25	1,5	0,75
11	Электропривод с ПЧ ATV31 «Транс-Атом»	Неверно сконфигурированы настройки цифровых входов	0,8	0,5	1,5	1,2
12	Электропривод с ПЧ ATV31 «Транс-Атом»	Двигатель не вращается, на дисплее сигнал «OHF»	1,25	1	1,75	1,5
13	Электропривод с ПЧ ATV31 «Транс-Атом»	Двигатель не вращается, на дисплее сигнал «rdY»	0,9	0,67	1	0,77
14	Электропривод с ПЧ ABB ACS355	ПЧ не управляется дистанционно	11	0,5	11,5	1
	Итого		80,95	5,67	118,5	33,22

Результаты апробации показывают, что:

- диагностирование ЭО преобразователей частоты, используемых в сфере автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, с помощью реализованной автоматизированной подсистемы «FCDS» позволяет достичь преимуществ по времени объёмом 85,3 часов, обеспечивая в среднем трёхкратное сокращение времени диагностирования и наладки;

- указанный выигрыш во времени получен за счёт реализации в рамках АПД «FCDS» эффективных логических алгоритмов диагностирования электрооборудования, а также благодаря реализации встроенных эвристических знаний в БЗ основной составляющей АПД – диагностического экспертного комплекса «FC3».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При выполнении диссертации получены следующие основные результаты:

1. Проанализировано современное состояние методов и систем диагностирования электрооборудования, включая оборудование электроприводов переменного тока.

2. На основании выполненного анализа предложены структура и алгоритмы функционирования автоматизированной подсистемы диагностирования электрооборудования преобразователей частоты.

3. Разработаны новые логические алгоритмы диагностирования электрооборудования, отличающиеся от известных алгоритмов правилами выбора первой проверки и большей эффективностью в применении к преобразователям частоты.

4. Предложена процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования электрооборудования преобразователей частоты. Разработан оптимальный логический алгоритм диагностирования преобразователей частоты, отличающийся минимальными затратами времени.

5. С опорой на оптимальный алгоритм разработана структура базы знаний экспертного комплекса для диагностирования электрооборудования преобразователей частоты.

6. В соответствии с предложенными структурой и алгоритмами функционирования реализована автоматизированная подсистема диагностирования электрооборудования преобразователей частоты, используемых в промышленности. Подсистема позволяет осуществлять диагностирование в режиме реального времени и в режиме консультационной помощи.

7. Апробация реализованной подсистемы показала, что её применение к реальному электрооборудованию преобразователей частоты позволяет обеспечить в среднем трёхкратное сокращение времени диагностирования и наладки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дунаев, М.П. Разработка экспертной системы для наладки преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 12(83). – С. 263-269.
2. Дунаев, М.П. Разработка диагностического экспертного комплекса / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №11(94). – С.233-240.
3. Дунаев, М.П. Алгоритмы диагностирования преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 2(97). – С. 194-198.
4. Дунаев, М.П. Новые алгоритмы диагностирования преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 6(113). – С. 128-135.
5. Бахвалов, С.В. Анализ оптимальных алгоритмов технического диагностирования / С.В. Бахвалов, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 7(114). – С. 55-59.
6. Дунаев, М.П. Метод структурирования базы знаний экспертной системы для диагностирования электрического оборудования / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**, С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1(53). – С. 86-89.
7. **Дунаев, А.М.** Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования / А.М. Дунаев // Вестник ИрГТУ. – 2018. – № 9(140). – С. 82-90.

В изданиях, рекомендованных ВАК по смежным специальностям:

8. Дунаев, М.П. Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник ИрГТУ. – 2019. – № 3(145). – С. 443-450.

В изданиях, индексируемых по базе данных SCOPUS:

9. Arshinskiy, L.V. Development of the expert system of electrical equipment setup based on logic with vector semantics / L.V. Arshinskiy, V.L. Arshinskiy, М.Р. Dunaev, **А.М. Dunaev**, V.S. Aslamova // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2018. – № 5. – Pp. 1119-1125.

Свидетельства о государственной регистрации:

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620249 от 11.02.2015 г. / Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). База данных для диагностирования промышленных преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614572 от 26.03.2021 г. / Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Программа для построения оптимального алгоритма диагностирования промышленного преобразователя частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**.

В других изданиях:

12. Дунаев, М.П. Интеллектуальный метод наладки преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2013. – № 1. – С. 16-20.
13. Дунаев, М.П. Экспертная система для наладки преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2013. – Том 3. – С. 25-30.
14. Дунаев, М.П. Классификация логических алгоритмов методов технической диагностики / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2014. – № 1. – С. 5-8.
15. Дунаев, М.П. Классификация логических алгоритмов технической диагностики [Электронный ресурс] / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник школы ДВФУ. – 2014. – № 2(19). – С. 18-25. – Режим доступа: <http://dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/2-19/4>.

16. Дунаев, М.П. Анализ логических алгоритмов методов технической диагностики / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2014. – Том 3. – С. 34-40.
17. Дунаев, М.П. Экспертная система для диагностирования преобразователя частоты на транспорте / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Безопасность регионов – основа устойчивого развития. – 2014. – № 1. – С. 7-11.
18. Дунаев, М.П. Логический алгоритм для диагностирования преобразователя частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2015. – № 1. – С. 77-81.
19. Дунаев, М.П. Алгоритм диагностирования преобразователя частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**, Я.О. Дунаева // Сборник научных трудов АГТА. – 2015. – № 1. – С. 100-104.
20. **Дунаев, А.М.** Разработка экспертного комплекса для диагностирования преобразователей частоты / А.М. Дунаев // Проблемы информационного и математического моделирования. – 2015. – № 1 – С. 37-42.
21. Дунаев, М.П. Новые логические алгоритмы технической диагностики [Электронный ресурс] / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Вестник школы ДВФУ. – 2015. – № 2(23). – С. 27-32. – Режим доступа: <http://dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/2-23/4>.
22. Дунаев, М.П. Экспертный комплекс для наладки преобразователей частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2015. – Том 3. – С. 20-28.
23. Дунаев, М.П. MN-алгоритм для диагностирования преобразователя частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2016. – № 1. – С. 53-56.
24. Дунаев, М.П. Диагностический алгоритм преобразователя частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**, Я.О. Дунаева // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2016. – № 1. – С. 189-194.
25. Бахвалов, С.В. Выбор алгоритма для построения базы знаний экспертной системы диагностирования электрооборудования / С.В. Бахвалов, **А.М. Дунаев**, М.П. Дунаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 2. – С. 46-51.
26. **Дунаев, А.М.** Перспективные направления развития методов технической диагностики / А.М. Дунаев // Техничко-экономические проблемы развития регионов. – 2016. – № 1. – С. 283-286.
27. **Дунаев, А.М.** Алгоритмизация построения оптимальной последовательности диагностических проверок преобразователя частоты / А.М. Дунаев // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2017. – № 1. – С. 17-21.
28. **Дунаев, А.М.** Автоматизация синтеза оптимального алгоритма диагностирования преобразователей частоты / А.М. Дунаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 2(6). – С. 143-151.
29. Дунаев, М.П. Моделирование систем управления статическими преобразователями частоты / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев**, Я.О. Дунаева // Вестник АнГТУ. – 2017. – № 11. – С. 46-52.
30. **Дунаев, А.М.** Программное управление преобразователем частоты / А.М. Дунаев // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2018. – № 1 – С. 27-30.
31. **Дунаев, А.М.** Структура системы диагностирования преобразователей частоты / А.М. Дунаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2018. – № 3(11). – С. 165-172.
32. **Дунаев, А.М.** Экспертная система для диагностирования центробежного вентилятора / А.М. Дунаев, Я.О. Дунаева // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2019. – № 1. – С. 102-105.
33. Дунаев, М.П. Автоматизированная система управления процессами сушки древесины / М.П. Дунаев, **А.М. Дунаев** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 2(14). – С. 133-141.
34. **Дунаев, А.М.** Диагностирование электрооборудования на транспорте с использованием интеллектуальных систем / А.М. Дунаев, М.П. Дунаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1(17). – С. 79-88.